Archive of SID

نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۰ / شماره ۱ / ۱۳۹۵

شبیه سازی واکنش دو رقم سویا به کم‌آبیاری با کاربرد مدل WOFOST

پریسا شاهین رخسار[۱]*، ابراهیم امیری، سامیه رئیسی و محمد اسماعیل اسدی

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گیلان.
pshahinrokhsar@yahoo.com
دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی لاهیجان.
eamiri57@yahoo.com
عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان.
saraeisi@yahoo.com
عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان.
iwc977127@yahoo.com

چکیده

امروزه حتی در مناطق مرطوب کشور، بحران آب یک مشکل عمده کشاورزی و افزایش بهره‌وری مصرف آب یکی از ملزومات توسعه پایدار است. با توجه به این امر، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه به‌عنوان ابزاری برای مدیریت بحران آب مفید به نظر می‌رسد. در این پژوهش از مدل WOFOST جهت شبیه‌سازی عملکرد دو رقم سویا تحت مدیریت کم‌آبیاری در منطقه گرگان استفاده شد. با استفاده از عملکرد اندازه‌گیری شده و اجزای بیلان آب شبیه‌سازی‌شده از مدل، مقدار متوسط بهره‌وری تبخیرتعرق (WP_{ET}) مبتنی بر عملکرد دانه ۰/۷۲ کیلوگرم دانه به ازای هر متر مکعب تبخیر تعرق حاصل شد. با افزایش تنش خشکی، بهره‌وری آب بر پایه مجموع آبیاری و بارش (WP_{I+R}) و بهره‌وری آب بر پایه مقدار آبیاری (WP_I) در هر دو رقم افزایش یافت ولی رقم دی پی ایکس در مواجه با تنش خشکی دارای بهره‌وری آب بالاتری نسبت به رقم سپیده بود. نتایج ارزیابی عملکرد و دقت مدل WOFOST نشان داد شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (nRSME) عملکرد دانه و بیوماس کل در هر دو رقم موردبررسی کمتر از ۱۰ درصد، شاخص ضریب جرم باقی‌مانده‌ها (CRM) نزدیک به صفر، ضریب کار آیی مدل (EF) ۰/۸۹، ضریب تبیین (R^2) ۰/۹۳ و شاخص توافق ویلموت (IOA) در حدود ۰/۸۹ به دست آمد. به‌طورکلی یافته‌های این تحقیق کار آیی مطلوب مدل را در شبیه‌سازی فرآیند رشد و تأثیر آب بر عملکرد و بهره‌وری آب سویا تأیید می کند و رقم دی پی ایکس در شرایط محدودیت آب برای کشت در استان گلستان توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بیوماس، سویارقم دی پی ایکس، عملکرد، بهره‌وری آب.

۱- آدرس نویسنده مسئول: رشت، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گیلان.
* - دریافت: خرداد ۱۳۹٤ و پذیرش: اسفند ۱۳۹٤

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

سویا (*Glycine max L.*) یکی از قدیمی‌ترین گیاهان زراعی جهت تولید روغن و پروتئین محسوب می‌شود و میانگین عملکرد جهانی سویا ۲/۳ تن در هکتار است (خواجه پور ۱۳۸٦). بر اساس آخرین آمار منتشرشده در سال ۱۳۸۹ بیش از ۸۰ درصد سطح زیر کشت سویای کشور آبی بوده است؛ که در این میان استان گلستان ۷٦ درصد از سطح زیر کشت و ۷٤ درصد تولید سویای کل کشور را به عهده داشته است (اسدی ۱۳۹۱).

مطالعات نشان می‌دهد که ارقام مختلف سویا عکس‌العمل متفاوتی به وضعیت رطوبتی خاک از خود نشان می‌دهند. مطالعه واکنش گیاه سویا نسبت به شرایط تنش آبی جهت معرفی رقم‌هایی که قادر به تحمل چنین شرایطی از تنش رطوبتی باشند، می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری آب گردد. بررسی واکنش ارقام مختلف سویا به میزان آب مصرفی نشان داد کم‌آبیاری در تمام ارقام مورد بررسی موجب افزایش تولید کل در منطقه شده است ولی رقم دی پی ایکس نسبت به بقیه ارقام واکنش مطلوب‌تری نسبت به آب برای تولید سویا دارد (کیانی ۱۳۸۹). از طرف دیگر یکی از شاخص‌های مورد استفاده در مباحث عملکرد گیاه و آب مصرفی که مبنای اقتصادی دارد، بهره‌وری آب است که به صورت نسبت عملکرد محصول به مقدار آب مصرفی تعریف می‌شود.

نتایج بررسی برخی از محققین نیز تأثیر کم‌آبیاری در بهبود شاخص بهره‌وری آب را مورد تأکید قرار داده‌اند (کانگ و همکاران ۲۰۰۰). امینی‌فر و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب در هفت رقم سویا در رشت دریافتند که رقم ۳۳ سویا با تولید ۱۵۱۲ کیلوگرم در هکتار، بیشترین بهره‌وری آب آبیاری در عملکرد دانه به میزان ۱/٦۷ کیلوگرم بر مترمکعب را دارا بود. بر اساس نتایج محققان مذکور، مدیریت آبیاری عاملی مهم در افزایش تولید محصول سویا است؛ بنابراین به نظر می‌رسد می‌توان به‌منظور صرفه‌جویی و افزایش بهره‌وری در مصرف آب از مدیریت کم‌آبیاری استفاده کرد. در این میان به‌منظور استفاده بهینه از منابع بیوفیزیکی نظیر آب و خاک استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد برای گیاهانی نظیر سویا گسترش یافته است (اتزینگر و همکاران ۲۰۰٤). این مدل‌ها ابزاری مناسب برای تعیین و پیش‌بینی اثرات مدیریت‌های زراعی نظیر آبیاری بر عملکرد محصول می‌باشند. به‌طوری‌که در صورت واسنجی صحیح مدل‌ها در هزینه و زمان مطالعات مزرعه‌ای صرفه‌جویی متنابهی خواهند داشت، استفاده از مدل‌هایی نظیر WOFOST[1] به دلیل نیاز به داده‌های ورودی کمتر به منظور پیش‌بینی میزان محصول، کارایی مصرف آب و بررسی تأثیر تنش آب در سویا توصیه می‌شود (پدرسون و همکاران ۲۰۰٤ و ستیونوا و همکاران ۲۰۱۰).

در WOFOST، رشد گیاه در شرایط آبیاری بهینه و محدود (کم‌آبیاری) به‌صورت دینامیکی با گام زمانی یک روزه بر اساس خصوصیات گیاهی، پارامترهای روزانه هواشناسی و خصوصیات فیزیکی خاک شبیه‌سازی می‌شود (بوگارد و همکاران ۱۹۹۸). در ارتباط با توانایی این مدل در شبیه‌سازی عملکرد سویا تحقیقات زیادی صورت نگرفته است؛ تنها ستیونوا و همکاران (۲۰۱۰) از چهار مدل رشد گیاهی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد سویا استفاده کردند بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مقدار RMSE[2] عملکرد دانه برای مدل CROPGRO-Soybean، Sinclair-Soybean، WOFOST و SoySim[3] به ترتیب ۰/۷۲، ۰/۹۱، ۱/٦۱ و ۰/٤٦ تن در هکتار حاصل شد. ضریب تبیین رگرسیون خطی (R^2) یک به یک محاسبه شده بین عملکرد دانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در مدل‌های مورد بررسی به ترتیب برابر با ۰/۲٦، ۰/۱۲، ۰/۲٦ و ۰/۹٤ به دست آمد. تمامی چهار

[1] WOrld FOod STudies
[2] Root Mean Square Error
[3] Soybean Growth Simulation Model

www.SID.ir

Archive of SID

مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس دارای خطای متوسط (ME[1]) بزرگ‌تر از صفر بودند.

کارایی بالای مدل WOFOST برای سایر محصولات نظیر گندم، ذرت و برنج مورد تائید بسیاری از محققین قرارگرفته است. به‌عنوان مثال مارلتو و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های هواشناسی و مدل گیاهی WOFOST شبیه‌سازی رشد گندم زمستانه در شرایط محدودیت آب، عملکرد دانه و رشد گیاه را پیش‌بینی نمودند. در ایران، امیری و رضایی (۱۳۹۰) و سعادتی و همکاران (۱۳۹۱) مدل WOFOST را برای شبیه‌سازی رشد و نمو برنج مورد استفاده قرار دادند. یافته‌های تحقیق آنان نشان داد مدل WOFOST در شبیه‌سازی فرآیند رشد و تأثیر آب بر عملکرد و بهره‌وری آب برنج در مناطق مرطوب دارای کارایی مطلوبی است.

با توجه به اینکه تاکنون گزارش‌های زیادی در خصوص استفاده از مدل‌های رشد گیاهی نظیر WOFOST در ارتباط با سویا منتشرنشده است، به نظر می‌رسد بتوان با استفاده از این ابزار، عکس‌العمل ارقام مختلف سویا را در شرایط محدودیت آب شبیه‌سازی نمود، لذا هدف از این پژوهش، واسنجی و ارزیابی توانایی آخرین نسخه مدل WOFOST در شبیه‌سازی واکنش کشت دو رقم سویا سپیده و دی پی ایکس در شرایط کم‌آبیاری و بهینه‌سازی بهره‌وری مصرف آب در منطقه گرگان است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای برآورد پارامترهای گیاهی و ارزیابی مدل WOFOST از داده‌های مستخرج از مقاله شاهین‌رخسار و رئیسی (۱۳۹۰) نظیر میزان آب آبیاری، تیپ رشدی ارقام مورد بررسی و زمان وقوع مراحل فنولوژیکی استفاده شد. پژوهش مذکور در سال ۱۳۸۷ در ایستگاه تحقیقات گرگان با موقعیت جغرافیایی طول ٥٤ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و عرض ۳٦ درجه و ٥٥ دقیقه شمالی و با ارتفاع از سطح دریا ۵/۵ متر انجام شده بود. تیمارهای اعمال شده در پژوهش عبارت بودند از دو تیمار کم‌آبیاری ۵۰ (I_{50})، ۷۵ (I_{75}) و ۱۰۰ (I_{100}) درصد نیاز آبی به عنوان عامل اصلی و دو تیمار رقم سپیده (رقم معرفی‌شده در استان گلستان) و دی پی ایکس به ترتیب زودرس و دیررس که به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شده بود (جدول ۱ و ۲).

پارامترهای ورودی مدل WOFOST

پارامترهای هواشناسی نظیر تابش، میانگین حداقل دمای روزانه، میانگین حداکثر دمای روزانه، سرعت باد در ارتفاع دو متری و کل بارش، در طول دوره رشد به صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی فرودگاه گرگان اخذ و وارد فایل هواشناسی مدلWOFOST نسخه ۷.۱.۲ شد (جدول ۳).

اطلاعات مربوط به مدیریت مزرعه، تاریخ کاشت و میانگین عملکرد و بیوماس واقعی و پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری شده (مجموع درجه حرارت از جوانه-زدن تا گلدهی، مجموع درجه حرارت از گلدهی تا رسیدگی، عملکرد و بیوماس کل و سطح برگ) از مقاله شاهین‌رخسار و رئیسی (۱۳۹۰) و اطلاعات واسنجی شده سویا از مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی محاسبه شد (جدول ٤). برای واسنجی مدل از بخش RERUN به‌عنوان جزئی از مدل استفاده شد.

اطلاعات مربوط به مدیریت مزرعه، تاریخ کاشت و میانگین عملکرد و بیوماس واقعی و پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری شده (مجموع درجه حرارت از جوانه زدن تا گلدهی، مجموع درجه حرارت از گلدهی تا رسیدگی، عملکرد و بیوماس کل و سطح برگ) از مقاله شاهین‌رخسار و رئیسی (۱۳۹۰) و اطلاعات واسنجی شده سویا از مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی محاسبه شد (جدول ٤). برای واسنجی مدل از بخش RERUN به‌عنوان جزئی از مدل استفاده شد.

[1] Modeling Efficiency

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- مشخصات تیپ رشدی ارقام مورد بررسی

رقم	تیپ رشدی	دوره رشد (روز)	ارتفاع	تیپ شاخه بندی	گروه رسیدگی	وزن هزار دانه (گرم)
دی پی ایکس	نیمه محدود	۱۴۰-۱۲۰	پا بلند	چند شاخه	۵ (دیررس)	۲۰۰
سپیده	نامحدود	۱۱۰-۹۰	پا بلند	تک شاخه	۳ (زودرس)	۱۸۰

جدول ۲- زمان وقوع مراحل فنولوژیکی بر اساس شماره روز از ابتدای سال میلادی (روز ژولیوسی)

رقم	مرحله فنولوژیکی	کاشت	جوانه‌زنی	گلدهی	رسیدگی فیزیولوژی
سپیده	شماره روز	۱۵۸	۱۶۴	۱۹۲	۲۷۰
دی پی ایکس	شماره روز	۱۵۸	۱۶۶	۲۱۳	۳۰۵

جدول ۳- پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد برای دو رقم سویا در منطقه گرگان

پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد	سپیده	دی پی ایکس
تابش با طول‌موج کوتاه، $MJm^{-2}d^{-1}$	۱۸/۶۵	۱۸/۱۳
میانگین حداقل دمای روزانه، ^0C	۲۲/۸	۲۲/۴
میانگین حداکثر دمای روزانه، ^0C	۳۳/۲	۳۲/۸
سرعت باد در ارتفاع دو متری، ms^{-1}	۵/۴	۵/۴
کل بارش، mm	۲۴	۲۷

جدول ۴- پارامترهای گیاهی سویا اندازه‌گیری شده و یا واسنجی شده از مدل

پارامتر	شرح	رقم	مقدار	واحد
[1]$TSUM_1$	مجموع درجه حرارت از جوانه زدن تا گلدهی*	سپیده	۶۰۰	^oCday
		دی پی ایکس	۱۰۶۰	
[2]$TSUM_2$	مجموع درجه حرارت از گلدهی تا رسیدگی*	سپیده	۱۶۵۰	^oCday
		دی پی ایکس	۱۸۰۰	
[3]SLA	سطح برگ ویژه	سپیده	۰/۰۰۱۴	$ha\ kg^{-1}$
		دی پی ایکس	۰/۰۰۱۴	
[4]RGRLAI	حداکثر افزایش نسبی در شاخص برگ	سپیده	۰/۰۱	$m^2\ m^{-2}\ hr^{-1}$
		دی پی ایکس	۰/۰۱	
[5]KDIF	ضریب روشنایی نور	سپیده	۰/۸	-
		دی پی ایکس	۰/۸	
[6]EFF	راندمان مصرف نور	سپیده	۰/۴۰	-
		دی پی ایکس	۰/۴۵	
[7]AMAX	حداکثر شدت جذب CO_2	سپیده	۳۵	$kg\ ha^{-1}\ hr^{-1}$
		دی پی ایکس	۳۵	

* بالای صفر فیزیولوژیکی

1 Temperature sum from emergence to anthesis
2 Temperature sum from anthesis to maturity
3 Specific leaf area
4 Maximum relative increase in LAI
5 Extinction coefficient for diffuse visible light as function of development stage
6 Initial light-use efficiency of CO2 assimilation of single leaves as function of daily temperature
7 Maximum leaf CO2 assimilation rate at development stage of the crop growth

www.SID.ir

Archive of SID

پارامترهای موردنیاز مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک در محدوده توسعه ریشه، نظیر رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی با استفاده از دستگاه صفحات فشاری و پارامترهای هدایت هیدرولیکی به کمک برنامه RETC[1] تخمین زده شد. برنامه RETC به‌منظور تحلیل منحنی رطوبتی و توابع هدایت هیدرولیکی به‌عنوان توابع کلیدی در توصیف کمی جریان غیراشباع آب ارائه شده است (ون گنوختن و همکاران ۱۹۹۱). برای این منظور داده‌های توزیع اندازه ذرات و جرم مخصوص ظاهری خاک به همراه مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مکش‌های مختلف به نرم افزار RETC وارد و پارامترهای معادله ون گنوختن تعیین شد. برخی خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش عبارت بودند از بافت سیلتی لوم، وزن مخصوص ظاهری ۱/٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب، رطوبت حجمی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی به ترتیب ۳۹ و ۱۷ درصد، رطوبت حجمی در نقطه اشباع ٤٥ درصد و هدایت هیدرولیکی اشباع ۱۸ سانتی‌متر بر روز (شاهین رخسار و رئیسی ۱۳۹۰).

معیارهای ارزیابی مدل

به‌منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل WOFOST از ترکیب روش‌های گرافیکی و آماری، مقایسه مقدار شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک (بیوماس کل) استفاده شد. نمودار پراکنش داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده و خطوط ۱:۱ نیز به‌منظور نشان دادن تناسب کلی مدل مورد استفاده قرار گرفت. جهت ارزیابی آماری نتایج شبیه‌سازی مدل آزمون t و متغیرهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا، (RMSE[2])، ریشه میانگین مربعات خطای نسبی، (nRMSE[3])، ضریب جرم باقی‌مانده‌ها، (CRM[4]) و ضریب کارایی مدل (EF[5]) و خطای متوسط (ME[6]) با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (جنسن و هبرگر ۱۹۹۵ و نش و سوتکلیف ۱۹۷۰).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O} \times 100} \quad (۳)$$

$$EF = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\right] \quad (٤)$$

$$CRM = \frac{[\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} S_i]}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad (۵)$$

$$ME = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Pi - Oi)}{n} \quad (٦)$$

که در آن:

Pi: مقدار شبیه‌سازی مدل اجزای گیاهی، Oi: مقدار اندازه‌گیری واقعی اجزای گیاهی، n: تعداد اندازه‌گیری واقعی اجزای گیاهی، $\hat{o}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری اجزای گیاهی است. معادله ۸ نحوه‌ی برآورد شاخص توافق ویلموت (IOA[7]) را نشان می‌دهد (اتزینگر و همکاران ۲۰۰٤).

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}.|Pi - \bar{P}| + |Oi - \bar{O}|^2} \quad (۷)$$

که در آن:

Pi: مقدار شبیه‌سازی مدل، Oi: مقدار اندازه‌گیری واقعی، n: تعداد اندازه‌گیری واقعی، $\bar{O}$ و $\bar{P}$: به ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی است.

بیلان و بهره‌وری آب

معادله بیلان آب در طول فصل زراعی به‌صورت زیر در نظر گرفته شد.

$$I + R = E + T + D + \Delta W \quad (۸)$$

که اجزای آن شامل I: آبیاری، R: بارندگی، E: تبخیر واقعی، T: تعرق واقعی، D: نشت و نفوذ عمقی و ΔW:

[1] Retention Curve
[2] Root Mean Square Error
[3] Normalized Root Mean Square Error
[4] Coefficient of Residual Mass
[5] Modeling Efficiency
[6] Mean Error
[7] Index of Agreement (IOA)

www.SID.ir

Archive of SID

تغییرات آب ذخیره شده در منطقه توسعه ریشه، است. مقدار آبیاری برای هر کرت توسط کنتور اندازه‌گیری شد (شاهین رخسار و رئیسی ۱۳۹۰). عمق آبیاری با هدف جایگزین نمودن رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه تا حد ظرفیت زراعی (FC) برای تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد محاسبه و برای بقیه تیمارها ضرایب مربوطه (۷۵ و ۵۰ درصد) اعمال شد (رابطه ۹). برای به دست آوردن عمق توسعه ریشه در نوبت‌های مختلف آبیاری، از نقاط مختلف مزرعه نمونه‌برداری و عمق توسعه ریشه اندازه‌گیری شد. دور آبیاری تابع میزان تخلیه رطوبت از نیمرخ خاک بود. بنابراین دور آبیاری طی فصل رشد یکسان نبوده ولیکن آبیاری تیمارهای آبی به‌طور همزمان انجام می‌پذیرفت. جهت تغییرات آب ذخیره‌شده در منطقه توسعه ریشه رطوبت خاک قبل و بعد از آبیاری با استفاده از روش وزنی، از منطقه توسعه ریشه نمونه‌برداری و اندازه‌گیری شد. پس از توزین نمونه‌ها و خشک‌کردن آن‌ها در آون و به دست آوردن وزن خشک، میزان نشت و نفوذ عمقی و تغییرات آب ذخیره شده در منطقه توسعه ریشه تعیین شد.

$$I = (\theta_{fc} - \theta_i) \times \rho_b \times D_Z \qquad (۹)$$

که در آن:

I: عمق خالص آبیاری، θ_i و θ_{fc}: به ترتیب درصد رطوبت‌های وزنی خاک قبل از آبیاری و ظرفیت مزرعه، ρ_b: وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و D_z: عمق توسعه ریشه (سانتی‌متر) می‌باشند.

مقدار بارندگی از ایستگاه هواشناسی فرودگاه گرگان دریافت شد. پتانسیل تبخیرتعرق بر اساس روش پنمن مانتیث و با استفاده از نرم‌افزار ET.Calculator به‌صورت روزانه محاسبه گردید (فائو ۲۰۰۹). برای محاسبه اجزای بهره‌وری آب از روابط زیر استفاده شد (سینق و همکاران ۲۰۰۸).

$$WPI = \frac{Yg}{I} \qquad (۱۰)$$

$$WPET = \frac{Yg}{(E+T)} = \frac{Yg}{ET} \qquad (۱۱)$$

$$WP(I+R) = \frac{Yg}{(I+R)} \qquad (۱۲)$$

در روابط فوق WP_I، WP_{ET} و WP_{I+R} : اجزای بهره‌وری آب (WP_I: بهره‌وری بر اساس میزان آب آبیاری، WP_{ET}: بهره‌وری بر اساس میزان تبخیرتعرق و WP_{I+R}: بهره‌وری بر اساس مجموع آب آبیاری و بارش)، Yg: مقدار عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، T: مقدار تعرق شبیه‌سازی شده به‌وسیله‌ی مدل (میلی‌متر)، E: مقدار تبخیر واقعی شبیه‌سازی شده به‌وسیله‌ی مدل (میلی‌متر)، R؛ مقدار بارش (میلی‌متر) و I؛ مقدار آبیاری (مترمکعب) است. مدل با استفاده از داده‌های آبیاری بهینه واسنجی شد و بر این اساس ضرایب واسنجی مدل به دست آمد. چنانچه مقدار نتیجه آزمون t بیشتر از ۰/۰۵ باشد، بدان مفهوم است که مقادیر شبیه‌سازی پارامتر در سطح احتمال ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری با مقدار اندازه‌گیری شده ندارد.

نتایج و بحث

واسنجی و کارایی مدل در برآورد

نتایج آزمون t نشان داد که مقادیر عملکرد و بیوماس کل شبیه‌سازی‌شده مدل در سطح احتمال ۹۵ درصد شبیه مقادیر عملکرد و بیوماس کل اندازه‌گیری است (T_{test}>۰/۰۵) (جدول ٦). نتایج ارزیابی کارایی مدل در برآورد میزان عملکرد نهایی (عملکرد دانه و بیوماس کل) نشان داد بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده مطابقت مطلوبی وجود دارد که نشان‌دهنده کارایی بالای مدل است (جدول ٦). ریشه میانگین مربعات خطای عملکرد (RMSE) دو رقم DPX و سپیده ۰/۲۳ و ۰/۱٤ تن در هکتار است. نتایج ستیونوا و همکاران (۲۰۱۰) این مقدار را برای مدل WOFOST ۱/٦۱ تن در هکتار به دست آمد. شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (nRMSE) عملکرد دانه و بیوماس کل در هر دو رقم مورد بررسی کمتر از ۱۰ درصد حاصل شد که در دامنه موردقبول قرار دارد (جامیسن و همکاران ۱۹۹۱). همچنین بررسی شاخص ضریب جرم باقی‌مانده‌ها ازنظر

www.SID.ir

Archive of SID

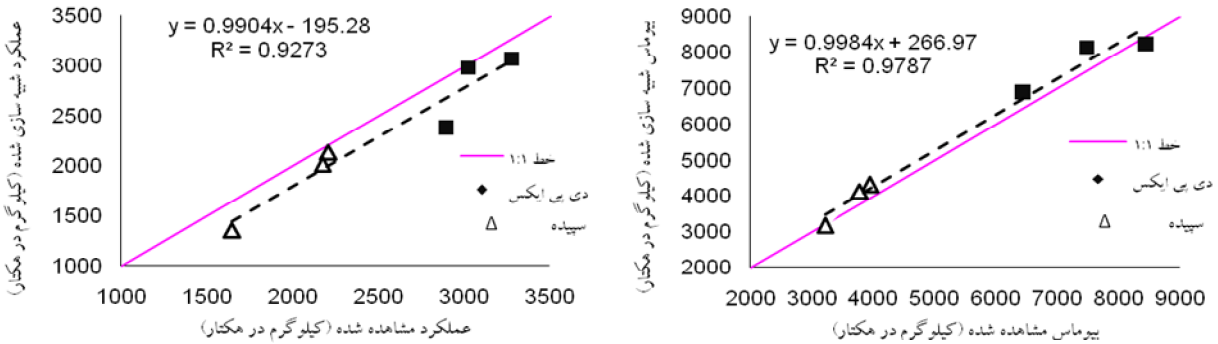
عملکرد دانه و بیوماس کل نزدیک به صفر گزارش شد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی پارامترهای اندازه‌گیری شده است (نش و سوتکلیف ۱۹۷۰). نتایج نشان داد که به جز عملکرد دانه در رقم دی پی ایکس، بقیه پارامترهای مورد بررسی از نظر ارزیابی بر اساس شاخص توافق ویلموت در محدود مطلوب و مقبولی (در حدود ۰/۸۹) هستند که نزدیک بودن به عدد یک نشان‌دهنده قابل‌اطمینان بودن مقادیر شبیه‌سازی شده است (اتزینگرو همکاران ۲۰۰٤). ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عملکرد دو رقم مورد بررسی از نظر متغیرهای آماری نشان داد در مدل رقم سپیده تطابق بهتری بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده شده وجود دارد. به‌طوری‌که در رقم سپیده ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برابر ۷/۰۱ درصد، ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۱٤ تن در هکتار، ضریب جرم باقی‌مانده‌های برابر ۰/۰۹ و شاخص توافق ویلموت ۰/۸۹ در مقایسه با رقم دی پی ایکس با ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برابر ۷/۵۲ درصد، ریشه میانگین مربعات خطای برابر ۰/۲۳ تن در هکتار، ضریب جرم باقی‌مانده‌های برابر ۰/۰۸ و شاخص توافق ویلموت ۰/۵۷ حاصل شد (جدول ٦). ارزیابی نتایج شبیه‌سازی بیوماس کل ارقام مورد بررسی به‌وسیله‌ی مدل نیز نشان داد ارقام مورد بررسی اختلاف اندکی از نظر شاخص‌های ارزیابی دارند (جدول ۷).

جدول ۶- ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عملکرد و بیوماس کل ارقام مورد بررسی به‌وسیله‌ی مدل WOFOST

رقم	test	CRM	EF	IOA	RMSE (تن در هکتار)	nRMSE (درصد)
عملکرد						
دی پی ایکس	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۹۸	۰/۵۷	۰/۲۳	۷/۵۲
سپیده	۰/۲۹	۰/۰۹	۰/۹۸	۰/۸۹	۰/۱٤	۷/۰۱
بیوماس کل						
دی پی ایکس	۰/۳۵	-۰/۰٤	۰/۹۹	۰/۹۰	۰/۳۳	٤
سپیده	۰/۳۱	-۰/۰٦	۰/۹۹	۰/۸۷	۰/۲۱	۵/٦۸

مقایسه مقادیر عملکرد دانه و بیوماس کل، مشاهده‌شده و مقادیر شبیه‌سازی‌شده‌ی آن به‌وسیله‌ی مدل، در دو رقم سپیده و دی پی ایکس با خط یک به یک در شکل ۱ نشان داده‌شده است. ضریب تبیین رگرسیون خطی (R^2) یک‌به‌یک محاسبه‌شده بین عملکرد دانه و بیوماس کل شبیه‌سازی‌شده و مشاهده شده به ترتیب برابر با ۰/۹۳ و ۰/۹۹ حاصل شد که کارکرد این مدل را در پیش‌بینی عملکرد سویا مورد تأیید قرار می‌دهد. ستیونوا و همکاران (۲۰۱۰) ضریب تبیین رگرسیون خطی (R^2) را با استفاده از مدل WOFOST ۰/۲٦ به دست آورد.

شکل ۱- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده عملکرد دانه و بیوماس کل برای دو رقم سپیده و دی پی ایکس



www.SID.ir

Archive of SID

در جدول ۸ عملکرد شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده‌ی ارقام مختلف سویا و درصد خطای متوسط (ME) شبیه‌سازی به‌وسیله‌ی مدل WOFOST در تیمارهای مختلف آبیاری مشاهده می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رفت با کاهش مقدار آب مورد نیاز، مقدار عملکرد اندازه‌گیری شده کاهش یافت و مدل نیز با دقت قابل قبولی کاهش عملکرد شبیه‌سازی شده را نشان داد. مقادیر منفی خطای متوسط نشان‌دهنده تخمین کمتر از مقدار مشاهده شده است (نش و سوتکلیف ۱۹۷۰). بر اساس نتایج جدول ۸ مدل در تمام تیمارهای آبیاری عملکرد شبیه‌سازی شده را کمتر از مقدار مشاهده شده تخمین زده است و با افزایش تنش خشکی مقدار خطای متوسط در هر دو رقم افزایش یافته است. نتایج شبیه‌سازی ستیونوا و همکاران (۲۰۱۰) با چهار مدل رشد گیاهی سویا نظیر CROPGRO-Soybean، Sinclair-Soybean، WOFOST و SoySim نشان داد تمامی چهار مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس دارای خطای متوسط (ME) بزرگ‌تر از صفر بودند که نشان‌دهنده‌ی بیش تخمین مقادیر شبیه‌سازی شده است.

مقایسه کاهش عملکرد بین تیمار آبیاری کامل (I_{100}) و تنش شدید (I_{50}) بین دو رقم مورد بررسی نشان داد با افزایش تنش خشکی میزان کاهش عملکرد در رقم سپیده و دی پی ایکس به ترتیب ۳٤ درصد و ۱۳ درصد است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود رقم زودرس سپیده در مواجه با تنش خشکی میزان کاهش عملکرد بیشتری در مقایسه با رقم دیررس دی پی ایکس از خود نشان داد که با نتایج برخی پژوهشگران هم‌خوانی دارد (هو ۲۰۰۹). نتایج در جدول ۸ نشان داد شبیه‌سازی به‌وسیله‌ی مدل این برآورد را ۵۷ درصد و ۲۹ درصد تخمین زد که بر اساس میزان خطای نسبی آن در محدوده قابل قبول بود (نش و سوتکلیف ۱۹۷۰).

جدول ۸- مقایسه عملکرد مشاهده و شبیه‌سازی‌شده و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی به‌وسیله‌ی مدل WOFOST

تیمار	سپیده			دی پی ایکس		
	مشاهده‌شده (تن بر هکتار)	شبیه‌سازی‌شده (تن بر هکتار)	خطای متوسط (درصد)	مشاهده‌شده (تن بر هکتار)	شبیه‌سازی‌شده (تن بر هکتار)	خطای متوسط (درصد)
I_{100}	۲/۲۱۰	۲/۱۳۰	-۳/۶	۳/۲۸۱	۳/۰۷۰	-۶/۴
I_{75}	۲/۱۷۵	۲/۰۱۲	-۷/۵	۳/۰۲۷	۲/۹۸۰	-۱/۶
I_{50}	۱/۶۴۸	۱/۳۵۴	-۱۷/۸	۲/۸۹۸	۲/۳۷۵	-۱۸

نتایج بررسی مقادیر بیوماس کل شبیه‌سازی شده و مشاهده شده‌ی ارقام مختلف سویا و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی در مدیریت‌های مختلف آبیاری به‌وسیله‌ی مدل WOFOST در جدول ۹ نشان داد که مدل برای رقم دی پی ایکس در شرایط آبیاری کامل بیوماس کل را ۲/۵ درصد تخمین کمتر از حد و در شرایط کم‌آبیاری I_{75} و I_{50} بیوماس کل را به ترتیب ۸/٦ و ٦/۹ درصد تخمین بیشتر از حد شبیه‌سازی می‌کند. باوجودی که مدل برای رقم سپیده در تیمارهای آبیاری I_{100} و I_{75} دارای تخمین بیش از حد بود، ولی این اختلاف ناچیز (خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد) است. در تیمار I_{50} نیز مدل تخمین کمتر از مقدار مشاهده‌شده گزارش داد که مقدار اختلاف آن قابل‌قبول و در حدود ۱/٦ درصد بود. همان‌گونه که در جدول ۹ ملاحظه می‌شود تنش خشکی موجب کاهش بیوماس کل در هر دو رقم شد. مدل کاهش بیوماس کل تحت شرایط تنش خشکی را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد، بنابراین ارزیابی مدل WOFOST بر اساس معیار خطای متوسط (ME) نشان‌دهنده توانایی مطلوب مدل مذکور در شبیه‌سازی عملکرد و بیوماس کل ارقام مورد بررسی سویا است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۹- مقایسه بیوماس مشاهده و شبیه‌سازی‌شده و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی به‌وسیله‌ی مدل WOFOST

تیمار	سپیده			دی پی ایکس		
	مشاهده‌شده (تن بر هکتار)	شبیه‌سازی‌شده (تن بر هکتار)	خطای متوسط (درصد)	مشاهده‌شده (تن بر هکتار)	شبیه‌سازی‌شده (تن بر هکتار)	خطای متوسط (درصد)
I_{100}	۳/۹۵۷	۴/۳۱۲	+۹	۸/۴۴۰	۸/۲۳۲	-۲/۵
I_{75}	۳/۷۷۸	۴/۱۳۷	+۹/۵	۷/۴۸۲	۸/۱۲۹	+۸/۶
I_{50}	۳/۲۱۸	۳/۱۶۶	-۱/۶	۶/۴۴۰	۶/۸۸۷	+۶/۹

بیلان آب

بررسی اجزای بیلان آب و عملکرد سویا نشان داد در تیمارهای کم‌آبیاری به دلیل تنش آبی تعرق گیاه کاهش‌یافته است (جدول ۱۰). مقدار تعرق در دوره رشد، تحت تأثیر شرایط و وضعیت رطوبتی خاک، کم‌آبی و میزان پوشش گیاهی است. رقم دی پی ایکس بیشترین تبخیر و تعرق را در تیمار آبیاری کامل به میزان ٤٤٤ میلی‌متر داشت. حتی در شرایط تنش خشکی (تیمار آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی) رقم مذکور تبخیرتعرق بیشتری در مقایسه با رقم سپیده در شرایط آبیاری کامل داشت. بر اساس نتایج کیانی (۱۳۸۹) کاهش عملکرد رقم دی پی ایکس متناسب با کاهش تبخیرتعرق آن نیست و به عبارت دیگر رقم مذکور در مقابل خشکی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. مقایسه میزان آب مصرفی دو رقم نشان داد در شرایط آبیاری کامل مقدار آب مصرفی (مجموع آبیاری و بارندگی) ارقام سپیده و دی پی ایکس به ترتیب ۵۱۳ و ٦٢٥ میلی‌متر برآورد شده است.

جدول ۱۰- اجزای بیلان آب و عملکرد سویا در ارقام مختلف در شرایط کم‌آبیاری

رقم	آبیاری	تبخیر (mm)	تعرق (mm)	آبیاری (mm)	تلفات (mm)	بارندگی (mm)	ذخیره ΔW(mm)
سپیده	I_{100}	۸۴	۲۱۸	۴۰۸	۱۵۹		۳۰
	I_{75}	۷۵	۲۰۹	۳۲۰	۸۴	۲۳	۲۵
	I_{50}	۹۳	۱۵۶	۲۰۰	۸۴		۱۱۰
دی پی ایکس	I_{100}	۸۳	۳۶۱	۵۶۳	۲۱۳		۳۲
	I_{75}	۸۳	۳۵۶	۴۴۴	۱۲۶	۶۲	۵۹
	I_{50}	۹۰	۳۰۰	۲۸۵	۴۹		۹۲

کیانی (۱۳۸۹) دامنه میزان آب کاربردی (مجموع باران مؤثر و آب آبیاری) در شرایط آب و هوایی گرگان برای سه رقم سویا (سحر، G3، DPX) به ترتیب به مقدار ۵۵۰، ۵۸۰ و ٦٤٠ میلی‌متر گزارش کرد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با اعمال کم‌آبیاری تلفات (نفوذ عمقی و رواناب) کاهش‌یافته است. به‌طوری‌که حداکثر مقدار تلفات آب در آبیاری کامل و رقم دی پی ایکس برابر ۲۱۳ میلی‌متر است. درحالی که در همین رقم در شرایط تنش خشکی تلفات ٤٩ میلی‌متر مشاهده شد (جدول ۱۰).

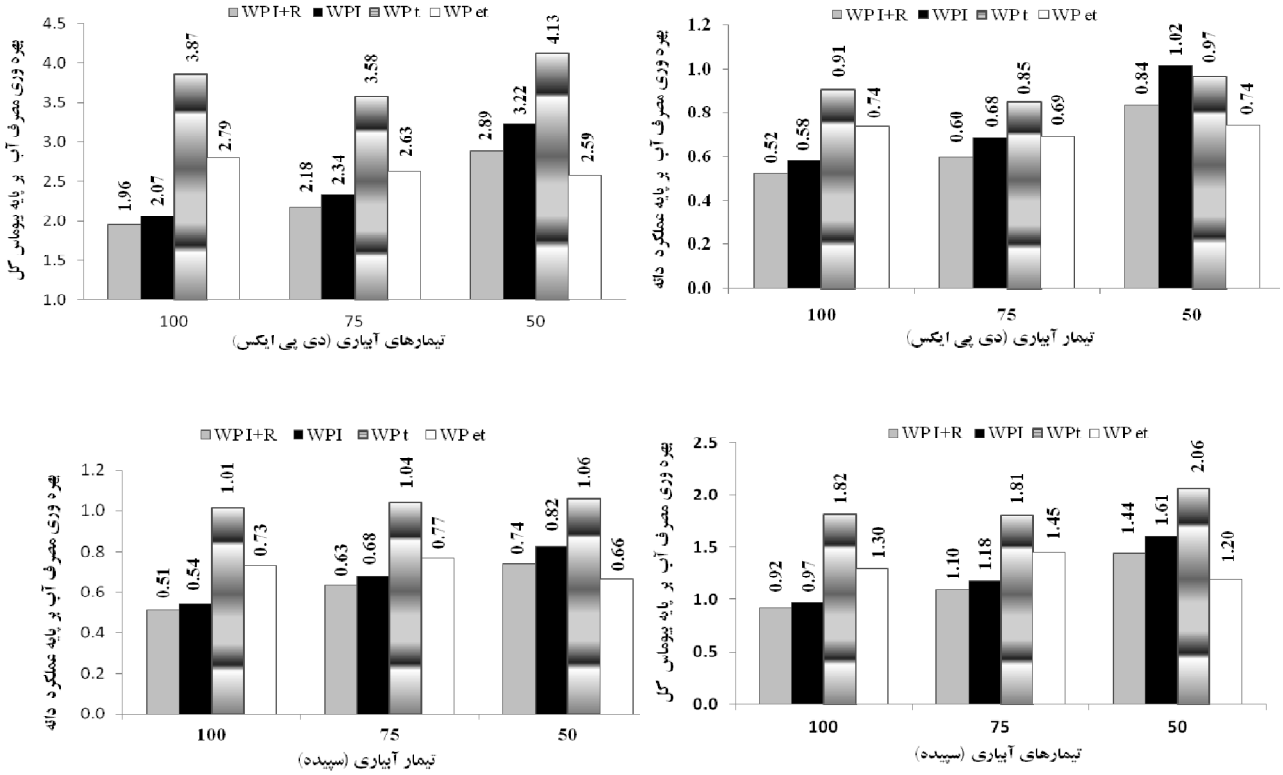
بهره‌وری آب

به‌منظور تخمین اجزای بهره‌وری آب (WP_{I+R}، WP_I و WP_{ET}) برای مدیریت‌های آبیاری از پارامترهای بیلان آب و مقدار عملکرد و بیوماس اندازه‌گیری شده واقعی استفاده شد (شکل ۲ و ۳). نتایج نشان داد که با کاهش مقدار آبیاری، شاخص بهره‌وری مجموع آبیاری و بارش (WP_{I+R}) و بهره‌وری مقدار آبیاری (WP_I) مبتنی بر عملکرد و بیوماس کل در هر دو رقم افزایش یافت که با نتایج امینی فر و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت دارد ولی در

www.SID.ir

Archive of SID

رقم دی پی ایکس با اعمال تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی میزان افزایش این دو شاخص هم در عملکرد و هم در بیوماس کل به ترتیب در حدود ۲۰ و ۵۰ درصد بیشتر از رقم سپیده حاصل شد (شکل ۳ و ٤). به نظر می‌رسد این رقم ازنظر تیپ رشدی با دوره کشت طولانی‌تر و از نظر تیپ شاخه‌بندی با تعداد شاخه بیشتر در مقایسه با رقم سپیده عملکرد و بیوماس بیشتری تولید می‌کند و همین مسئله موجب افزایش بهره‌وری آب رقم مذکور در شرایط تنش خشکی شده است.



شکل ۲- مقایسه میزان بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف آبیاری برای ارقام سویا

تأثیر کاهش تعرق ناشی از تنش خشکی بر افزایش بهره‌وری آب بر پایه تبخیرتعرق (WP_{ET}) در اشکال ۳ و ٤ ملاحظه می‌شود، بهره‌وری آب عملکرد دانه بر پایه تبخیرتعرق (WP_{ET}) به‌طور متوسط ۰/۷۲ کیلوگرم دانه به ازای هر مترمکعب تبخیرتعرق برای هر دو رقم حاصل شد (شکل ۲ و ۳). مقایسه بهره‌وری آب بیوماس کل بر پایه تبخیرتعرق (WP_{ET}) نشان داد از رقم دی پی ایکس در آبیاری کامل به ازای هر متر مکعب تبخیر تعرق، بهره‌وری آب بیشتری یعنی در حدود ۲/۷۹ کیلوگرم بر مترمکعب در مقایسه با رقم سپیده به میزان ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب حاصل شده است (شکل ۳). به نظر می‌رسد بالا بودن بهره‌وری آب این رقم در شرایط محدودیت آب به دلیل خصوصیات ژنتیکی خود رقم باشد. چرا که از نظر ژنتیکی رقم دی پی ایکس جزء ارقام رشد نیمه محدود است این خاصیت کمک می‌کند تا این رقم بخشی از آثار زیان‌بار عوامل محیطی را با ادامه رشد زایشی تعدیل کند (کیانی ۱۳۸۹).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج ارزیابی آماری و گرافیکی مدل در شبیه‌سازی فرایند رشد و تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد دانه و بیوماس کل، کارایی بالای مدل WOFOST تأیید شد. به‌طوری‌که شاخص‌های آماری مورد بررسی در محدوده قابل قبول و مطلوب ارزیابی شدند. از این‌رو به

www.SID.ir

Archive of SID

نظر می‌رسد می‌توان از این مدل در تعیین استراتژی‌های بهینه مدیریت آب در شرایط کمبود آب و برای کشت سویا استفاده کرد. هرچند پیشنهاد می‌شود مطالعات مزرعه‌ای در چند سال متوالی و با ارقام دیگر برای اعتبار سنجی و واسنجی نهایی مدل انجام شود. بر اساس این نتایج و به دلیل بهره‌وری بالای آب رقم دی پی ایکس، این رقم در شرایط محدودیت آب برای کشت در منطقه گلستان توصیه می‌شود.

فهرست منابع

۱. اسدی، م. ا. ۱۳۹۱. مدیریت بهینه آب در گیاهان زراعی. انتشارات نوروزی. گرگان.

۲. امیری، ا. رضایی، م. معتمد، م. ک. و امامی، س. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل رشد گیاهی WOFOST در شرایط مدیریت آبیاری. نشریه زراعت (پژوهش و سازندگی) ۹۰: ۱۷-۹.

۳. امینی فر، ج. بیگلوئی، م. ح. محسن آبادی، غ. و سمیع زاده، ح. ۱۳۹۰. تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب در هفت رقم سویا در منطقه رشت. نشریه دانش آب‌وخاک (٤) ۲۱: ۹۲-۸۱.

٤. خواجه پور، م. ر.۱۳۸٦. گیاهان صنعتی. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان.

۵. سعادتی، ز. پیرمرادیان، ن. امیری، ا. و رضایی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم برنج تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. نشریه پژوهش آب در کشاورزی(۳) ۲٦: ۳۳۷-۳۲۳.

٦. شاهین رخسار، پ. و رئیسی، س. ۱۳۹۰. بهینه کردن مصرف آب سویا در شرایط خشک‌سالی. نشریه دانش آب‌وخاک، (٤) ۲۱: ٦٤-۵۳.

۷. کیانی، ع.ر. ۱۳۸۹. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری بر اساس رابطه‌ی آب – عملکرد در چند رقم سویا. نشریه تحقیقات مهندسی کشاورزی (۱) ۱۱: ۱۰۲-۸۵.

8. Boogaard, H.L., Van Diepen, C.A., Rotter, R.P., Cabrera, J.C.M. and H.H. Van Laar. 1998. WOFOST 7.1 User guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5, Technical Document 52. DLO Winand Staring Center. Wageningen, the Netherlands.

9. Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z., and M. Dubrovsky. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions, Ecological Modeling. 171: 223-246.

10. FAO, 2009. ETo calculator version 3.1. In: evapotranspiration from Reference Surface. FAO, Land and Water Division, Rome Italy, pp. 1-65.

11. Farahani, H.J., Izzi, G., and T.Y. Oweis. 2009. Parameterization and evaluation of the Aqua Crop model for full and deficit irrigated cotton, Agronomy Journal, 101: 469–476.

12. Hu, X. 2009. Comparative response of early – maturing and late – maturing soybean cultivars to an irrigation gradient. M.sc. thesis. University of arkansas.USA. Division of agriculture. P133.

13. Jamieson, P.D., Porter, J.R., and D.R. Wilson. 1991. A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research, 27: 337–350.

14. Janssen, P.H.M., and P.S.C. Heuberger. 1995. Calibration of process-oriented models. Ecological Modeling, 83: 55–66.

15. Kang, S., Shi, W., and J. Zhang. 2000. An improved water use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. Field Crop Resource, 67: 207-214.

www.SID.ir

Archive of SID

16. Marletto, V., Ventura, F., Fontana, G., and F. Tomei. 2007. Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model. Agriculture Meteorology, 147: 71–79.
17. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part 1. A discussion of principles, Hydrology Journal. 10:282–290.
18. Pedersen, P., Boote, K. J., Jones, J.W., and J.G. Lauer. 2004. Modifying the CROPGROSoybean model to improve predictions for the upper Midwest. Agronomy Journal, 96:556–564.
19. Setiyonoa, T.D., Cassmana, K.G., Spechta, J.E., Dobermannb, A., Weissc, A., Yangd, H., Conleye, S.P., Robinsonf, A.P., Pederseng, P., and J.L. De Bruinh. 2010. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions.Field Crops Research, 119:161–174.
20. Singh, A.K., Tripathy, R., and U. K. Chopra .2008. Evaluation of CERES Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. Agricultural Water Management, 95: 776-786.
21. Van Genuchten, M.TH., Leij, F.J., and S.R. Yates.1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. U.S. Salinity Laboratory. Department of agriculture, Agricultural research service. Riverside, California.

www.SID.ir